

## ТЕПЛООБМЕН И ТРЕНИЕ В ГАЗОЖИДКОСТНОМ ТЕЧЕНИИ В НАКЛОННОМ ПЛОСКОМ КАНАЛЕ.

О.Н. Кашинский<sup>1</sup>, В.В. Рандин<sup>1,2</sup>, А.В. Чинак<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт теплофизики СО РАН им. С.С. Кутателадзе, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

Представлены результаты экспериментального исследования пузырькового газожидкостного течения в наклонном плоском канале. Измерения проводились в диапазоне приведенных скоростей жидкости  $0.3 \div 1.1$  м/с и при различных значениях расходного объемного газосодержания. Измерения гидродинамической структуры были проведены с помощью электрохимического метода с использованием миниатюрных датчиков трения. Определены значения среднего трения и коэффициента теплообмена при различной ориентации канала. Показано, что в пузырьковом газожидкостном течении наблюдается существенная зависимость трения и теплообмена от угла наклона канала.

### Введение

Многообразие режимов потоков существенно усложняет теоретическое предсказание гидродинамики двухфазного течения, требуя использования многочисленных гипотез, предположений и приближений. Нередко сложность структуры течения делает невозможным чисто теоретическое описание его поведения и требует использования эмпирических данных. Поэтому экспериментальное изучение газожидкостных потоков является актуальным.

В литературе широко и подробно представлены экспериментальные исследования восходящего газожидкостного течения в вертикальных трубах и каналах [1, 2]. Значительно менее исследовано газожидкостное течение в каналах другой ориентации. В отличие от однофазного течения, структура двухфазного потока существенно зависит от ориентации канала и направления движения фаз [3].

Целью настоящей работы являлось изучение влияния газовых пузырей и угла наклона на теплообмен и гидродинамику двухфазного течения в наклонном плоском канале.

### Экспериментальная установка и методика измерений

Экспериментальная установка (рис.1) представляла собой замкнутый по жидкости циркуляционный двухфазный контур. Рабочая жидкость из бака (1) с помощью центробежного насоса (2) через расходомеры (3 и 4) подавалась в рабочий участок - прямоугольный канал из оргстекла с поперечным сечением  $10 \times 100$  мм, длиной 1.7 м. В качестве расходомеров жидкости использовались ротаметры. Расход жидкости регулировался с помощью регулировочных вентилях (5). На входе рабочего участка была установлена форкамера (6) с конфузоров и сеткой для выравнивания потока по поперечному сечению канала. Рабочий участок состоял из нескольких секций (7-9), соединенных фланцами. В измерительной секции (9) помещались датчики трения (10) и температуры (11). На верхней стенке измерительной секции была наклеена фольга из нержавеющей стали толщиной 200 мкм, длиной 273 мм и шириной 73 мм. Эта фольга служила нагревательным элементом. На входе рабочего участка был также установлен датчик температуры для измерения температуры входящего потока. После рабочего участка жидкость подавалась в верхний бак – сепаратор (12), где отделялась от газа и вновь сливалась в основной бак (1). Газ (воздух) подавался от компрессора через расходомерную диафрагму (13). Перепад

давления на диафрагме измерялся с помощью дифференциального датчика давления (14) МРХ5050 фирмы “Motorola”. Регулировка расхода газа производилась вентилем (15). Газ вводился в поток жидкости через 21 капилляр с внутренним диаметром 0.3 мм. Капилляры были вклеены в оргстеклянную вставку, помещенную на нижней стенке канала. Пузыри газа образовывались при отрыве газа от торцов капилляров, которые выступали на 5мм от нижней стенки канала. Газожидкостный поток, получавшийся при смешении газа и жидкости, поступал в измерительную секцию рабочего участка. Расстояние от места ввода газа до измерительной секции было равно 750 мм. Температура рабочей жидкости поддерживалась постоянной на уровне 25° С с помощью автоматической системы термостатирования (16÷19). Угол наклона канала  $\theta$  отсчитывался от вертикали, таким образом, положение  $\theta=0^\circ$  соответствовало вертикальному положению канала, а  $\theta=90^\circ$  - горизонтальному.

Исследования гидродинамики течения проводились электродиффузионным методом [4]. В качестве рабочей жидкости использовался раствор ферри- и ферроцианида калия и углекислого натрия в дистиллированной воде. Датчики касательного напряжения (рис. 2) были установлены на верхней стенке измерительного участка, они представляли собой платиновые пластинки размером 0.1x0.9 мм (1), вваренные в стеклянный капилляр (2). Датчики были вклеены в стенку канала и зашлифованы заподлицо с ней (3).

В качестве датчиков температуры использовались миниатюрные (2x2x1 мм) платиновые термосопротивления 700-102ВАА-В00 фирмы “Heraeus Sensor Technology” с номинальным сопротивлением 1 кОм при 0° С. Датчики прикреплялись к обратной поверхности металлической фольги в измерительной секции. Для обеспечения хорошего теплового контакта датчиков использовалась теплопроводная паста. В измерительной секции было установлено 7 датчиков температуры. Для измерения температуры входного потока в

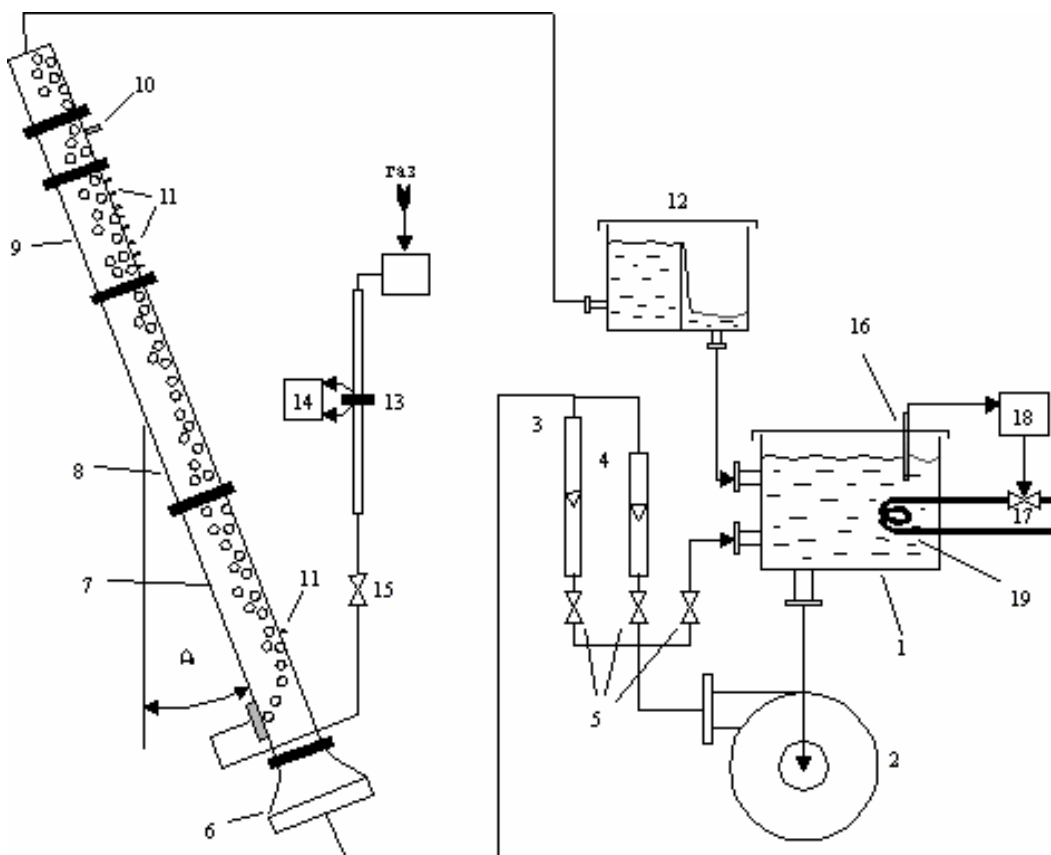


Рис. 1. Экспериментальная установка.

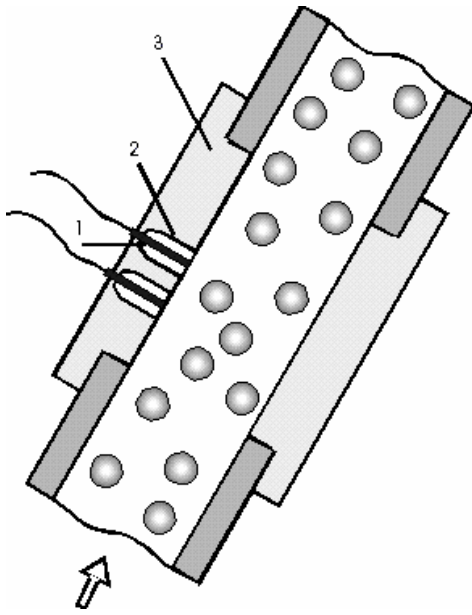


Рис. 2. Блок датчиков трения.

начале рабочего участка был установлен еще один датчик температуры. Нагрев производился посредством пропускания электрического тока через фольгу. В течение измерений сила тока поддерживалась постоянной. Измерение тока проводилось с помощью датчика тока типа CSLA2EN фирмы “Honeywell”. В рабочем режиме ток через нагреватель достигал значений 210 А. Таким образом реализовывалось граничное условие  $q_{стенки} = const$ . Все измерения проводились при температурном напоре  $\Delta T \approx 5^\circ$ . Перед проведением измерений вся система “датчики+усилители+АЦП” была прокалибрована при помощи жидкостного термостата с погрешностью  $\pm 0.1^\circ$ .

Эксперименты проводились в диапазоне приведенных скоростей жидкости  $\bar{u}$  от 0.3 до 1.1 м/с. Объемное расходное газосодержание  $\beta = \bar{u}_g / (\bar{u} + \bar{u}_g)$  изменялось от 0.01 до 0.2. Во всех исследованных режимах поток оставался пузырьковым.

### Результаты измерений

Получены зависимости трения и коэффициентов теплообмена на верхней стенке канала от скорости жидкости и газосодержания, а также от угла наклона канала.

Для проверки методики измерения и измерительной системы были проведены измерения в однофазном потоке. Измерения показали, что безразмерные коэффициенты теплоотдачи хорошо совпадают с известной зависимостью для однофазного турбулентного потока [5]:

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4}$$

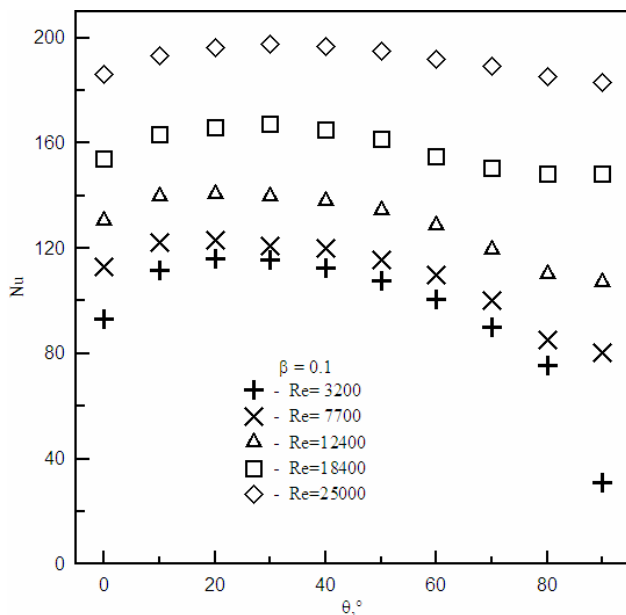


Рис. 3. Зависимость коэффициента теплообмена от угла наклона канала.

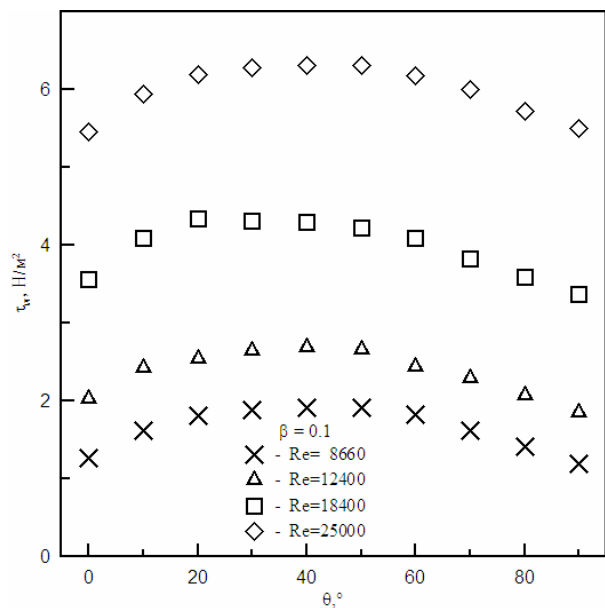


Рис. 4. Зависимость трения на стенке от угла наклона канала.

Отклонение экспериментальных данных от теоретической кривой не превышало 5%. В качестве линейного размера в критериях Nu и Re использовалась удвоенная высота канала (20 мм).

На рисунках 3 и 4 приведены результаты измерений теплообмена и касательного напряжения на стенке в газожидкостном пузырьковом потоке в зависимости от угла наклона канала и приведенного числа Рейнольдса, построенного по приведенной скорости и вязкости жидкости. Измерения проводились при  $\beta=0.1$ . Видно, что зависимость числа Нуссельта и касательного напряжения на стенке от угла наклона качественно похожи. Максимумы теплоотдачи и касательного напряжения на стенке наблюдаются в диапазоне углов наклона канала  $\theta \approx 20^\circ \div 50^\circ$ . Это объясняется тем, что, во-первых, при этих углах газовая фаза сосредоточена вблизи верхней (измерительной) стенки канала, а, во-вторых, проекция силы Архимеда на ось канала достаточно велика. Это приводит к тому, что, всплывая вблизи верхней стенки канала, пузыри увеличивают вихревой перенос импульса и тепла в этой области. При углах наклона канала близких к вертикали распределение пузырей по сечению канала становится более однородным, а концентрация пузырей вблизи верхней стенки снижается, что приводит к снижению вклада пузырей в вихревой перенос у верхней стенки. При углах наклона канала близких к горизонтальному газовая фаза сосредоточена вблизи верхней стенки, но проекция силы Архимеда на ось канала близка к нулю и скорость пузырей относительно жидкости мала, что также уменьшает вклад газовой фазы в вихревой перенос.

С увеличением приведенного числа Рейнольдса жидкости зависимости Nu и  $\tau_w$  от угла наклона становятся слабее. При скорости жидкости более 1 м/с ( $Re=25000$ ) разница между максимальным и минимальным значением коэффициента теплоотдачи составляет  $\sim 7\%$ , а для  $Re=7700$  такая разница составляет  $\sim 35\%$ . Для касательного напряжения на стенке разница между максимальным и минимальным значением составляет  $\sim 37\%$  при  $Re=8660$  и  $\sim 14\%$  при  $Re=25000$ . Следует отметить, что при углах наклона канала близких к горизонтальному положению ( $80^\circ \div 90^\circ$ ) и малой скорости жидкости пузыри активно объединяются и течение может менять структуру, переходя в снарядное. Этот процесс приводит к большому разбросу в измерениях.

На рисунке 5 приведены зависимости отношений  $Nu/Nu_0$  и  $\tau_w/\tau_{w0}$  от значений числа

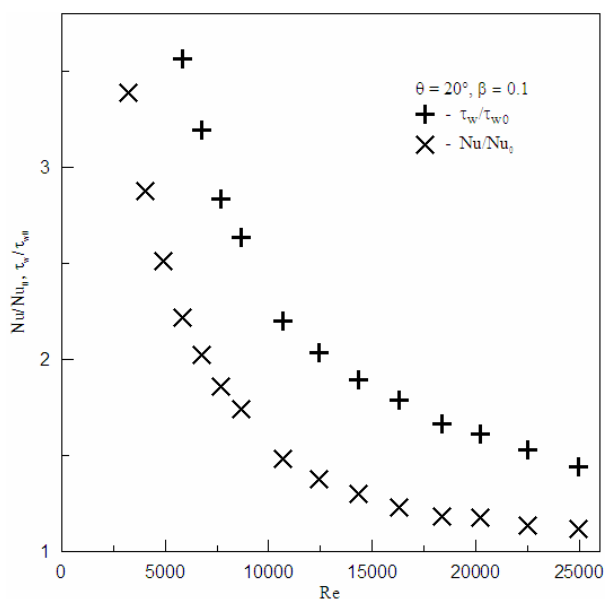


Рис. 5. Зависимость трения и теплообмена от Re.

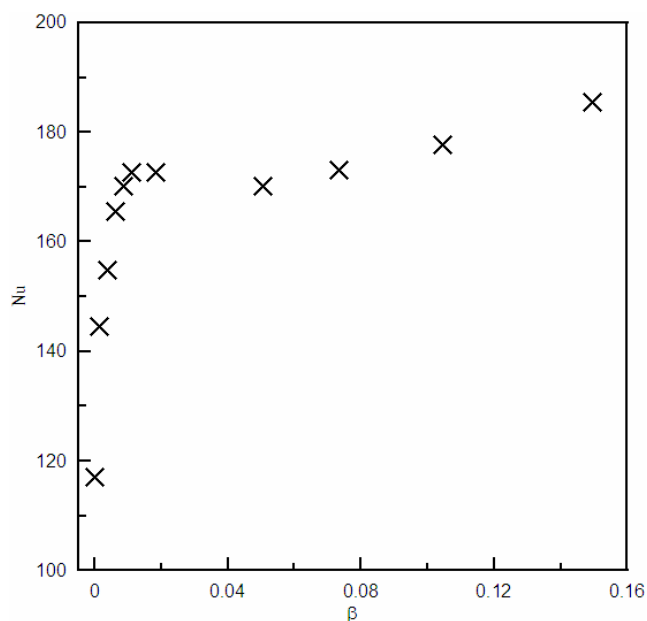


Рис. 6. Зависимость коэффициента теплообмена от газосодержания ( $Re=12400$ ,  $\theta=45^\circ$ ).

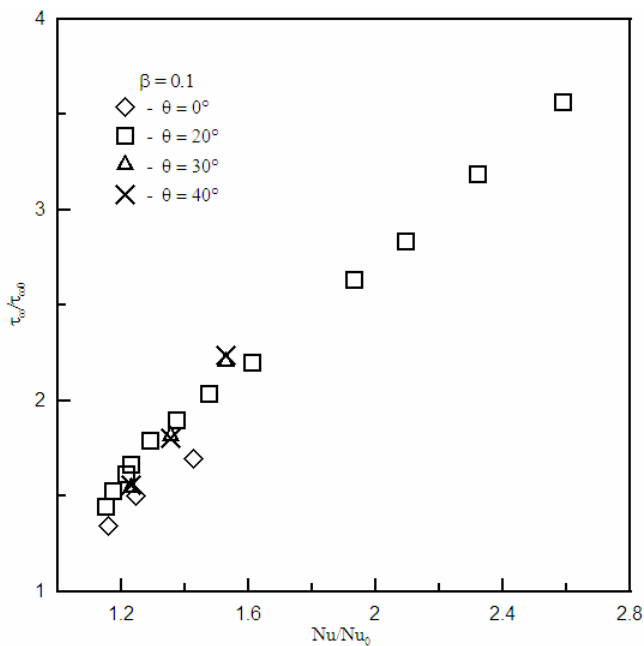


Рис. 7. Аналогия между теплообменом и трением в газожидкостном потоке.  $Re=5800-25000$ .

Рейнольдса,  $Nu_0$ -число Нуссельта в однофазном потоке,  $\tau_{w0}$ -касательное напряжение на стенке в однофазном потоке. Эксперименты проводились при угле наклона канала  $\theta=20^\circ$  и  $\beta=0.1$ . Приведенные данные показывают, что степень интенсификации теплообмена и касательного напряжения на стенке в двухфазном потоке по отношению к однофазному быстро уменьшается с ростом числа Рейнольдса. Это означает, что вклад пульсаций от пузырей при больших числах Рейнольдса по жидкости становится незначительным по сравнению с естественными турбулентными пульсациями несущей жидкости.

Зависимость коэффициента теплоотдачи от объемного расходного газосодержания ( $\beta$ ) имеет довольно

сложный характер (рис. 6). Малые добавки газа (до 1%) в поток жидкости приводят к резкому увеличению коэффициента теплоотдачи по сравнению с однофазным течением. При росте газосодержания от 5% до 15% происходит постепенный рост коэффициента теплоотдачи. При газосодержании 1÷2% наблюдается небольшой экстремум теплоотдачи. Этот экстремум может быть связан с тем, что при увеличении расхода газа диаметры пузырей, отрывающихся от капилляров, несколько увеличиваются, кроме того, при увеличении газосодержания усиливается процесс коалесценции пузырей. А как известно, мелкодисперсная газовая фаза оказывает большее влияние на интенсификацию процессов переноса.

На рисунке 7 экспериментальные данные представлены в виде зависимости  $\tau_w/\tau_{w0}$  от  $Nu/Nu_0$ . Данные получены при расходном газосодержании  $\beta=0.1$ , углах наклона канала  $\theta=0^\circ; 20^\circ; 30^\circ; 40^\circ$  и числах Рейнольдса  $Re=5800\div 25000$ . При таком представлении данных однофазному течению соответствует точка  $\tau_w/\tau_{w0}=1$   $Nu/Nu_0=1$ . С увеличением газосодержания и уменьшением числа Рейнольдса точка, соответствующая данному режиму, будет удаляться от “однофазной точки” ( $\tau_w/\tau_{w0}=1$ ,  $Nu/Nu_0=1$ ). Видно, что все приведенные точки на графике расположены вблизи области, которую можно аппроксимировать прямой.

При одних и тех же параметрах течения степень возрастания теплообмена по отношению к однофазному течению оказывается несколько меньше, чем степень возрастания трения. Возможно, это в определенной степени связано с частичной блокировкой поверхности теплообмена газовыми пузырями, которые в большинстве режимов “прижаты” к верхней стенке канала, где и находился нагреватель.

### Заключение.

Представлены результаты экспериментального исследования напряжения трения на стенке и теплообмена в двухфазном пузырьковом течении в прямоугольном канале переменной ориентации. Показано, что в газожидкостном течении угол наклона канала по отношению к горизонту оказывает существенное влияние на трение и теплообмен. Наибольшие значения трения и теплообмена соответствуют промежуточным углам наклона канала.

Отмечено качественное подобие поведения трения и теплообмена при изменении угла наклона канала. Показано, что степень влияния газовой фазы на трение и теплообмен уменьшается с увеличением приведенной скорости жидкости.

### **Литература**

1. Sun X., Kim S., Smith T. R., Ishii M. Local liquid velocity measurements in air-water bubbly flow // Experiments in Fluids. 2002. № 33, P 653-662.
2. Magaud F., Souhar M., Wild G., Boisson N. Experimental study of bubble column hydrodynamics // Experiments in Fluids. 2001. № 56, P 4597-4607.
3. Кашинский О.Н., Чинак А.В., Каипова Е.В. Пузырьковое газожидкостное течение в наклонном плоском канале // Теплофизика и аэромеханика. 2003. Т. 10, № 1, С. 71-78.
4. Накоряков В.Е., Бурдуков А.П., Кашинский О.Н., Гешев П.И. Электродиффузионный метод исследования локальных характеристик турбулентных течений / Институт теплофизики. Новосибирск. 1986. 247 с.
5. Михеев М.А. Основы теплопередачи / Государственное энергетическое издательство. Москва. 1949. 397 с.